

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.03.026

加槽钢做连接构件的空间半刚性梁柱节点 滞回性能分析

蔡 勇, 吕晓勇, 杨文超, 李 喆
(中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 加槽钢做连接构件的空间半刚性弱轴端板连接是一种新型的端板连接形式. 为研究其抗震性能, 对加槽钢做连接构件的空间半刚性梁柱节点在循环荷载作用下的受力性能进行了有限元分析, 分析了其强轴节点加载屈服时, 弱轴节点在循环加载作用下的受力特点、节点刚度和耗能能力. 分析结果表明, 加槽钢做连接构件的弱轴节点具有良好的耗能能力, 强轴的加载对弱轴节点极限承载力几乎没有影响, 但对弱轴节点的滞回性能具有一定的影响. 并根据有限元分析结果, 修正了加槽钢做连接构件的弱轴节点的曲线形滞回模型的表达式, 可为实际工程提供参考.

关 键 词: 槽钢; 空间节点; 半刚性; 受力特点; 滞回性能

中图分类号: TU 392.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)03-0430-06

Hysteretic Behavior of Semi-rigid Space Steel Beam-to-Column Joints with Channel Components

CAI Yong, LYU Xiao-yong, YANG Wen-chao, LI Zhe
(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China. Corresponding author: LI Zhe, E-mail: o9lizhe@163.com)

Abstract: Semi-rigid space end-plate connections of weak-axis with channel components are new end-plate connections form. The finite element analysis of semi-rigid space beam-to-column joints with channel components under cyclic loading was carried out in order to investigate its seismic performance, and the mechanical characteristics, joint stiffness and energy dissipation capacity of weak-axis joints under cyclic loading were analyzed when its strong-axis joint was yielded under the static load. The results showed that the weak-axis joint with channel components has a good energy dissipation capacity, and the loading of strong-axis has almost no effect on the weak-axis connections' capacity property but exerts some effect on the weak-axis connections' hysteretic behavior. In accordance with the results of the finite element analysis, the curvilinear hysteretic model expression of weak-axis joints with channel components was modified, which may provide reference for practical projects.

Key words: channel components; space joint; semi-rigid; mechanical characteristics; hysteretic behavior

在钢框架中,梁与柱的连接一般由螺栓和型钢组合配置构成,在传统的钢框架设计和分析中,一般都假设梁与柱的连接方式为完全刚性连接或者是理想的铰接连接^[1]. 由于连接组合材料自身并不连续,在实际工程结构中,钢框架梁柱节点所表现出来的性能属于半刚性连接,即其既不是完全刚性也不是理想铰接,而是介于这两种极端情况之间. 因此,针对钢框架的实际受力情况,一些现代设计规范做出了相应的定义及规定. 针对半刚性连接受力性能,欧洲钢结构设计规范 EUROCODE 3^[2]作了相应规定,ASIC-LRFD^[3]定义了部分约束框架的概念,并规定连接的柔性

必须在钢框架设计和分析中予以考虑. 中国《钢结构设计规范》(GB50017—2003)^[4]也提出“在内力分析时,必须预先确定连接的弯矩-转角特征曲线,以便考虑连接变形的影响”.

螺栓端板连接属于常用的半刚性连接形式,之前主要是针对半刚性梁柱端板连接的强轴方向和弱轴方向做了许多试验研究及理论分析,而针对空间半刚性梁柱端板连接节点性能的研究则相对较少. 蔡勇等^[5]基于国内外已有的弱轴连接构造形式^[6-9],提出了一种新型弱轴连接构造:加槽钢做连接构件的半刚性弱轴端板连接. 本文先采用 ABAQUS 有限元软件建立了该节点的有限元模型,再对节点在单向等比例加载下的受力性能进行分析. 并将此空间节点中弱轴节点的静力性能与文献[6]中端板连接于柱腹板弱轴节点的静力性能做对比,讨论了两种弱轴节点的优劣.

本文在文献[5]的基础上,将进一步对空间半刚性节点和端板连接于柱腹板的弱轴节点在循环加载下的动力性能进行分析. 由于目前对强轴端板连接在循环加载下的滞回性能研究较多,对于空间节点,本文仅讨论将其强轴节点加载屈服时,弱轴节点在循环加载作用下的受力特点、节点刚度和耗能特性,分析强轴节点加载时对弱轴节点滞回性能的影响.

1 有限元模型描述及建立

空间半刚性梁柱节点的几何尺寸如下:柱截面采用 H150 mm × 150 mm × 7 mm × 10 mm,柱高 1 600 mm,弱轴梁截面采用 H125 mm × 60 mm × 64 mm × 8 mm,强轴梁截面采用 H125 mm × 100 mm × 6 mm × 8 mm,梁长均为 600 mm. 强轴梁用外伸端板直接连接于柱的翼缘板上,弱轴梁通过一个焊接于柱翼缘间的槽钢而连接在柱子上,焊缝位于槽钢翼缘与柱翼缘交界处. 端板厚度均为 10 mm. 由于焊接槽钢的存在,弱轴与柱连接时不需要对柱的腹板开洞口. 为了便于拧紧螺栓和槽钢的焊接,槽钢翼缘宽度略大于柱腹板翼缘宽度的一半. 节点构造详图见图 1.

模型单元的选取,材料的本构关系及属性,模型中的接触关系,边界条件以及有限元模型的网格划分均参考文献[5].

模型的循环加载方案根据实际情况,按照《钢结构设计规范》(GB50017—2003)^[4]的规定,先利用 Bolt Load 在高强螺栓的中面施加 100 kN 的螺栓预紧力,然后在柱轴向施加 400 kN 的轴向

力,再根据文献[5]中强轴节点在单向加载时得到的节点屈服位移,采用位移控制的加载方式在强轴梁端部施加集中静力荷载直至强轴节点屈服,最后在弱轴梁端施加循环荷载,共模拟 5 种工况作用下弱轴节点的滞回性能(见表 1),包括:①文献[6]中端板连接于柱腹板的弱轴节点的滞回性能;②加槽钢做连接构件的弱轴节点的滞回性能;③空间半刚性梁柱节点角柱上弱轴节点的滞回性能;④空间半刚性梁柱节点边柱上弱轴节点的滞回性能;⑤空间半刚性梁柱节点中柱上弱轴节点的滞回性能. 根据《建筑抗震试验方法规程》(JGJ 101—96)^[10]的规定和文献[5]中弱轴节点在单向加载时得到的节点屈服位移 δ_y ,循环加载方案见表 1.

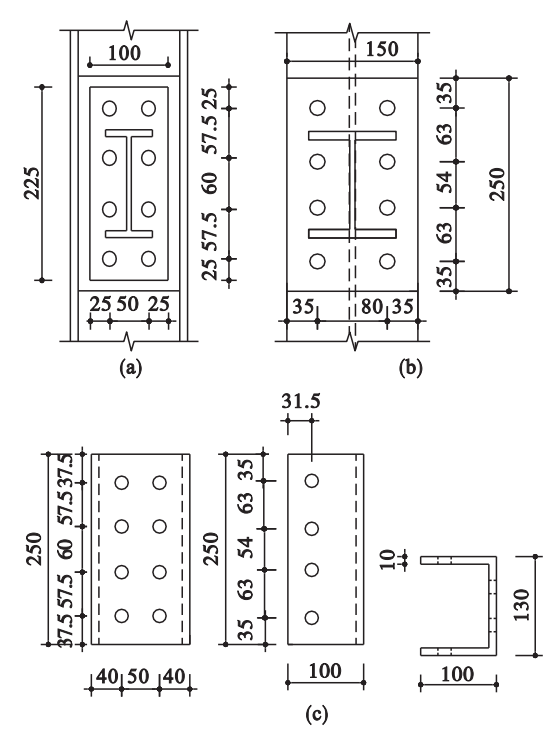


图 1 节点详图(mm)
Fig. 1 Joint details
(a)—弱轴节点图;(b)—强轴节点图;
(c)—槽钢构件三视图.

2 结果分析

2.1 相关概念及计算参数说明

1) 节点转角定义与计算. 节点的转角 θ 定义为:在荷载作用下,钢梁中心线与钢柱中心线之间夹角的变化量(见图 2),按下式计算:

$$\theta = (d_1 - d_2)/H. \tag{1}$$

式中: θ 为节点转角; d_1, d_2 为梁上翼缘、下翼缘的水平位移; H 为梁高.

表 1 荷载工况表
Table 1 Loading conditions

工况编号	工况介绍
工况 1(C01)	端板连接于柱腹板的弱轴节点梁端施加循环荷载,确定其滞回性能
工况 2(C02)	在空间节点的弱轴梁端施加循环荷载,确定单个弱轴的滞回性能
工况 3(C03)	在一个强轴上加单调位移荷载至屈服,再在一个弱轴梁端施加循环荷载,模拟角柱上弱轴节点的滞回性能
工况 4(C04)	在一个强轴上加单调位移荷载至屈服,再在两个弱轴梁端施加循环荷载,模拟边柱上弱轴节点的滞回性能
工况 5(C05)	在两个强轴上加单调位移荷载至屈服,再在两个弱轴梁端施加循环荷载,模拟中柱上弱轴节点的滞回性能

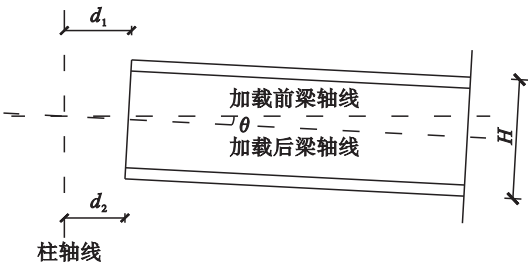


图 2 节点转角计算示意图
Fig. 2 Calculation of joint rotation

2) 初始刚度的定义与计算. 节点的初始刚度定义为: 节点在梁端弯矩作用下, 节点转角仍然处于弹性范围内时, 节点所具有的刚度. 节点的弯矩 - 转角关系曲线表达式在原点的一阶导数即为节点的初始转动刚度:

$$K_i = \left. \frac{dM}{d\theta} \right|_{\theta=0} \tag{2}$$

式中, K_i 就是节点的初始转动刚度.

3) 耗能能力的定义与计算. 结构或构件的耗能能力是指其在外荷载作用下的能量耗散能力, 是评价抗震能力的重要指标. 结构或构件的耗能能力与其变形状态有关, 根据《建筑抗震试验方法规程》(JGJ 101—96)^[10] 的规定, 节点的耗能能力用荷载 - 变形滞回曲线所包围的面积来衡量. 对于空间半刚性梁柱节点来说, 由于受到强轴的影响, 弱轴节点在正、负弯矩作用时, 其弯矩 - 转角关系 ($M - \theta$) 曲线不一定是对称的, 因此, 将每级荷载作用下构件所消耗的能量分为 x 轴上方的面积 J_i^+ 和 x 轴下方的面积 J_i^- 两个部分.

2.2 两种弱轴节点滞回分析对比

用文献[5]中已验证可以较好模拟文献[6]中试验模型的 ABAQUS 有限元模型, 在工况 1

(C01)下计算得到文献[6]中端板连接于柱腹板的弱轴节点的弯矩 - 转角滞回曲线, 如图 3 所示; 加槽钢做连接构件的弱轴节点的弯矩 - 转角滞回曲线见图 4.

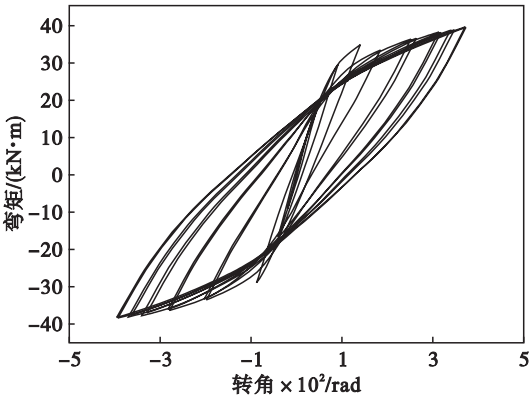


图 3 文献[6]中工况 C01 下弱轴节点滞回曲线图
Fig. 3 Hysteretic curves of joint in weak-axis under C01 from literature[6]

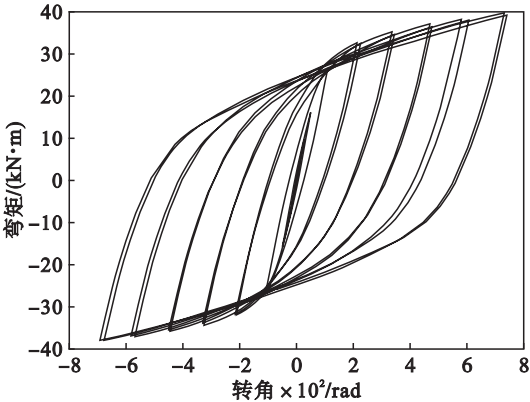


图 4 工况 C02 下弱轴节点滞回曲线图
Fig. 4 Hysteretic curves of joint in weak-axis under C02

通过对比图 3 和图 4 中的弯矩 - 转角滞回曲线, 可以看出:

1) 图 3 和图 4 中的弯矩 - 转角滞回曲线均呈现出梭形, 图 4 中的滞回曲线相对更为饱满, 因为两个节点除连接形式不同外, 构件尺寸、材料本构关系、边界条件和加载方案均相同, 所以可以说明, 与端板连接于柱腹板的弱轴节点相比, 由于槽钢的存在, 加槽钢做连接构件的弱轴节点具有更好的耗能能力.

2) 刚度退化是指在位移不断增大的条件下, 刚度不断减小的现象, 两种弱轴节点的滞回曲线中, 节点的刚度均出现了退化现象, 这与实际情况是吻合的.

3) 加载时, 端板连接于柱腹板的弱轴节点变形主要是端板和柱腹板的变形, 加槽钢做连接构件的弱轴节点则主要是槽钢腹板的变形. 从图中可以看出, 两种节点的刚度相差不大, 但是加槽钢做连接构件的弱轴节点塑性性能更好.

为了更进一步分析两种弱轴节点在循环作用下的滞回耗能,根据节点的滞回数据,采用数值积分的方法计算了两种节点每个循环圈所消耗的能量,具体数据见图 5。由图 5 可以看出,在前 3 圈(节点屈服之前)的循环加载中,梁节点所消耗的能量均基本为零,这是因为在弹性阶段,节点还没有出现塑性变形。在第 3 圈之后的循环加载中(节点屈服之后),两种节点所消耗的能量均随着循环圈数的增加而增大。在第 3 圈之后的循环加载中,加槽钢做连接构件的弱轴节点每个循环圈所消耗的能量均大于端板连接于柱腹板的弱轴节点所消耗的能量,并且随着循环圈数的增多,两者的差值越来越大。通过对每个循环圈数所消耗的能量进行求和,发现在整个循环加载过程中,前者消耗总能量为 31 246 J,后者为 11 077 J,前者为后者的 2.82 倍,进一步从数据上说明了加槽钢做连接构件的弱轴节点的耗能优势。

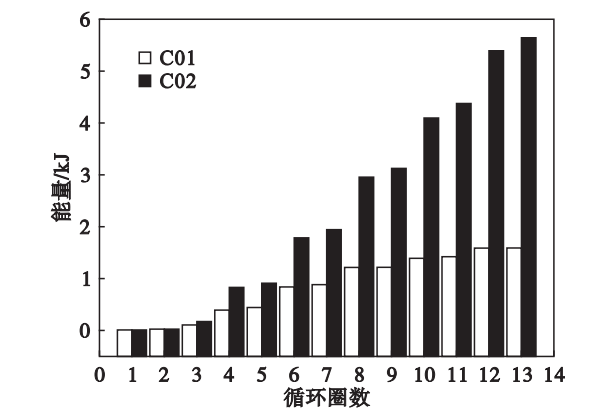


图 5 C01 与 C02 滞回耗能对比图
Fig. 5 Comparison of enery dissipation between C01 and C02

2.3 强轴加载对弱轴节点滞回性能的影响

采用单调荷载将强轴节点加载到屈服时,分别对角柱、边柱、中柱上的弱轴节点进行滞回性能分析,并分别与单个弱轴时的滞回结果做对比。

通过对比其弯矩-转角滞回曲线及滞回耗能,可以得出以下结论:

1)角柱、边柱和中柱弱轴节点的滞回曲线与单个弱轴的滞回曲线相比形状大体一致,饱满程度均有所降低,但是降低幅度很小,均表现出良好的耗能性能。

2)与单个弱轴的滞回曲线相比,角柱、边柱和中柱弱轴节点的滞回曲线均存在刚度退化现象,并且刚度退化均比单个弱轴的滞回曲线更明显。

3)3 种荷载工况下的弱轴节点极限承载力为 39.6 ~ 39.9 kN·m,均接近单个弱轴节点的极限承载力 39.6 kN·m,说明强轴的加载对弱轴节点

的极限承载力几乎没影响。

4)在第 3 圈之后的循环加载中(节点屈服之后),弱轴节点每圈所消耗的能量均随着循环圈数的增加而增大。在第 3 圈之后的循环加载中,3 种工况下弱轴节点每个循环圈所消耗的能量均小于单个弱轴节点所消耗的能量,并且随着循环圈数的增多,两者的差值有所增加,但增加的幅度很小,通过对每个循环圈数所消耗的能量进行求和,发现在整个循环加载过程中,角柱弱轴节点总耗能为 28 295 J,边柱弱轴节点总耗能为 27 644 J,中柱弱轴节点总耗能为 27 298 J,与单个弱轴节点总耗能 31 246 J 相比,角柱、边柱和中柱弱轴节点在整个循环加载过程中所耗能分别降低 10.4%,13.0%,14.5%,说明强轴的加载对弱轴节点的耗能能力有一定影响。

2.4 M-θ 骨架曲线

把弱轴节点弯矩-转角的所有每次循环的峰值点(卸载点)连接起来得到的包络线,即节点的弯矩-转角骨架曲线。文献[11]采用试验拟合的方法确定了平端板连接的 M-θ 恢复力模型,给出了折线形滞回模型和曲线形滞回模型,其中,弯矩-转角关系曲线形滞回模型的骨架曲线采用的是 Kishi-Chen 三参数幂函数表达式,表达式如下:

$$\theta = \frac{M}{K_i} \cdot \frac{1}{[1 - (M/M_u)^n]^{1/n}} \quad (3)$$

式中: K_i 是连接的初始转动刚度; M_u 是连接的极限弯矩承载力; n 是 M-θ 曲线的形状参数,采用文献[11]中的建议值 1.5。

采用式(3)作为加槽钢做连接构件的弱轴节点的弯矩-转角滞回模型,将通过有限元分析得到的滞回曲线与理论计算曲线对比,通过对比可得:采用有限元分析得出的弱轴 M-θ 骨架曲线与采用式(3)得出的理论 M-θ 骨架曲线吻合程度较好,因此,加槽钢做连接构件弱轴节点的弯矩-转角关系曲线形滞回模型的骨架曲线可采用式(3)来表示。

2.5 M-θ 滞回模型

文献[11]提出平端板连接滞回曲线形状定义:

$$\theta - \theta_{ul} = \frac{M - M_{ul}}{K_i} \times \frac{1}{[1 - ((M - M_{ul})/(M_u^+ + M_u^-))^n]^{1/n}} \quad (4)$$

式中: θ_{ul} , M_{ul} 为卸载时的转角及对应的弯矩;形状参数 n 统一取为 1.5^[11]。

采用式(4)作为加槽钢做连接构件的弱轴节点的弯矩-转角滞回模型,将通过有限元分析得

到的滞回曲线与理论计算曲线对比,如图 6 所示。从图可得:理论计算结果与有限元分析结果吻合程度较好,但理论计算曲线比有限元分析得到的滞回曲线相对更为饱满,即没有很好地模拟出滞回曲线的捏缩效应,高估了节点的滞回耗能能力。因此,需对式(4)进行修正。理论计算曲线与有限

元分析得到的滞回曲线主要是在 $-\theta_y < \theta < \theta_y$ 范围内吻合程度不好,因而只需要修正该范围内的理论计算曲线,其他部分不变。在该范围内进行刚度折减,对有限元分析得到的滞回曲线进行拟合,从而得到该范围内修正后的表达式。修正后的表达式如下:

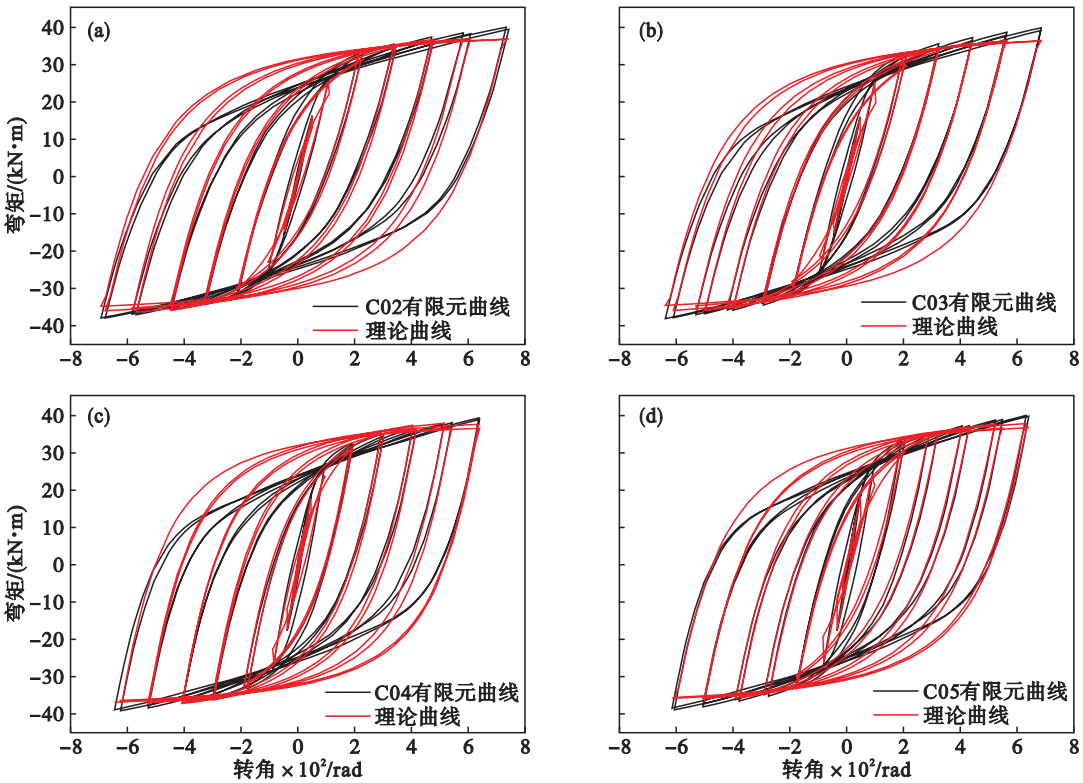


图 6 曲线形滞回模型与有限元滞回曲线对比

Fig. 6 Comparison of hysteretic models between the theoretical curves and the calculated curves by FEA

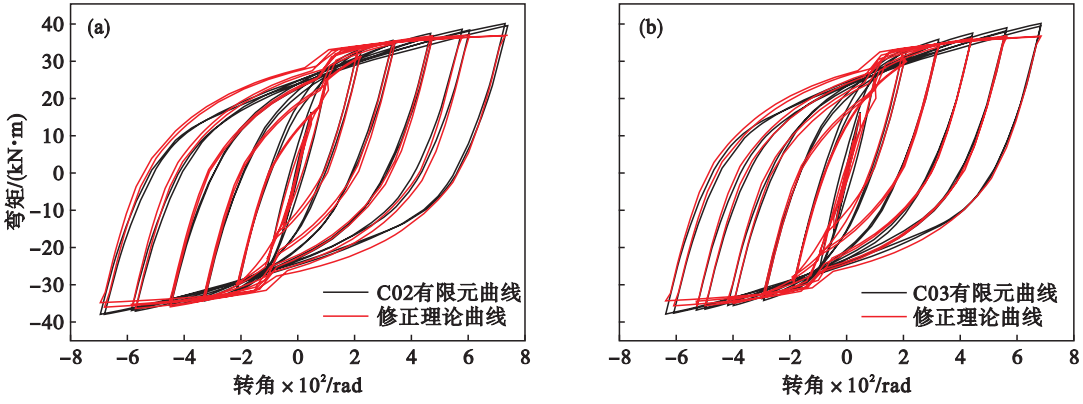
$$\theta - \theta_{ul} = \begin{cases} \frac{M - M_{ul}}{K_i} \times \frac{1}{[1 - ((M - M_{ul}) / (M_u^+ + M_u^-))^n]^{1/n}} (M_{ul} > 0 \& (M > 0 \parallel \theta < -\theta_y) \\ \text{或 } M_{ul} < 0 \& (M < 0 \parallel \theta > \theta_y)), \\ \frac{1.5M - M_{ul}}{K_i} \times \frac{1}{[1 - ((1.5M - M_{ul}) / (M_u^+ + M_u^- + 0.5|M|))^n]^{1/n}} (\text{其他}). \end{cases} \quad (5)$$

式中, θ_y 为弱轴节点的屈服转角,可由弱轴节点骨架曲线得到。

采用式(5)作为加槽钢做连接构件的弱轴节

点的弯矩 - 转角滞回模型,将通过有限元分析得到的滞回曲线与理论计算曲线对比,如图 7 所示。

由图可得:修正后的理论计算结果与有限元分析



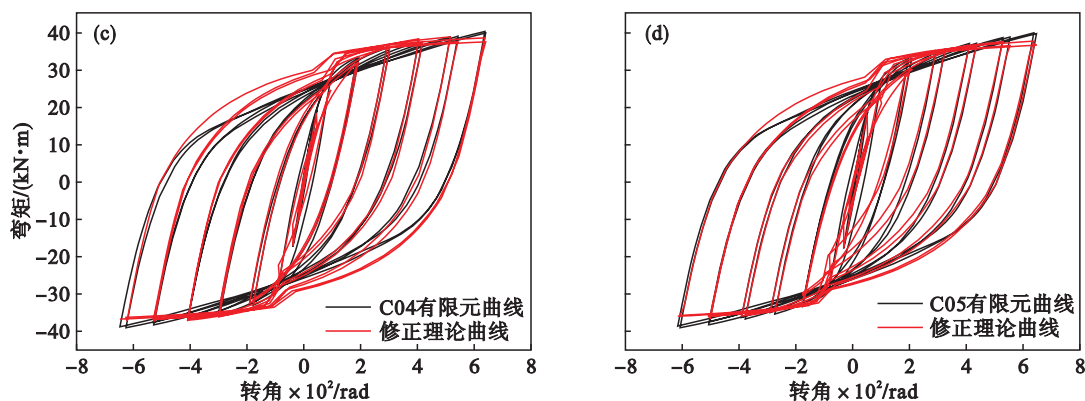


图 7 修正后的曲线形滞回模型与有限元滞回曲线对比

Fig. 7 Comparison of hysteretic models between the modified curves and the caculated curves by FEA

结果吻合程度较好,并且与未修正前的理论曲线相比,能较好地模拟出滞回曲线的捏缩效应。

3 结 论

1)与端板连接于柱腹板的弱轴节点相比,加槽钢做连接构件的弱轴节点具有更好的耗能能力。

2)空间半刚性梁柱节点中,角柱、边柱、中柱上强轴的加载对弱轴节点的耗能能力有所削弱,并且削弱的程度接近,在耗能方面不可以忽略强轴的加载对弱轴节点耗能能力的影响。

3)不种荷载工况下空间半刚性梁柱节点中弱轴节点的极限承载力都很接近,强轴的加载对弱轴节点的极限承载力几乎没影响。

4)曲线形滞回模型与有限元分析得到的滞回曲线吻合良好,但是没有很好地模拟出滞回曲线的捏缩效应;修正后的曲线形滞回模型与未修正前的理论曲线相比,能较好地模拟出滞回曲线的捏缩效应。

参考文献:

[1] 陈惠发. 钢框架稳定设计 [M]. 周绥平,译. 上海:世界图书出版公司,1999:264-481.
(Chen Hui-fa. Stability design of steel frames [M]. Translated by Zhou Sui-ping. Shanghai: World Publishing Corporation,1999:264-481.)

[2] LRFD. Load and resistance factor design; manual of steel construction [M]. 3rd ed. Chicago: American Institute of Steel Construction,2003.

[3] CEN. Eurocode 3; design of steel structures. Part 1. 8; design of joints (EN 1993-1-8) [S]. [S. l.]:[s. n.],2005.

[4] 张启文,夏志斌,黄友明,等. 钢结构设计规范:GB50017—2003 [S]. 北京:中国计划出版社,2003.
(Zhang Qi-wen, Xia Zhi-bin, Huang You-ming, et al. Steel structure design code: GB50017—2003 [S]. Beijing: China

Planning Press,2003.)

[5] 蔡勇,杨文超. 加槽钢做连接构件的空间半刚性梁柱节点有限元分析 [J]. 铁道科学与工程学报,2015,12(2):355-360.
(Cai Yong, Yang Wen-chao. Finite element analysis of three-dimensional steel semi-rigid beam-to-column joints with channel component [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*,2015,12(2):355-360.)

[6] 王湛,王涛. 半刚性钢框架梁柱弱轴端板连接的试验研究和有限元分析 [J]. 土木工程学报,2012,45(8):83-89.
(Wang Zhan, Wang Tao. Experiment and finite element analysis for the end plate minor axis connection of semi-rigid steel frames [J]. *China Civil Engineering Journal*,2012,45(8):83-89.)

[7] Cabrero J M, Bayo E. The semi-rigid behaviour of the three-dimensional steel beam-to-column joints subjected to proportional loading. part I: experimental evaluation [J]. *Journal of Construct Steel Research*,2006,63(9):1241-1253.

[8] Cabrero J M, Bayo E. The semi-rigid behaviour of the three-dimensional steel beam-to-column joints subjected to proportional loading. part II: theoretical model and validation [J]. *Journal of Construct Steel Research*,2006,63(9):1254-1267.

[9] Lourerio A, Moreno A. Experimental and numerical analysis of three-dimensional semi-rigid steel joints under non-proportional loading [J]. *Engineering Structures*,2012,38(4):68-77.

[10] 吴世英,董世民,黄浩华,等. 建筑抗震试验方法规程: JGJ101—96 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,1996.
(Wu Shi-ying, Dong Shi-min, Huang Hao-hua, et al. Specficating of testing methods for earthquake resistant building: JGJ101—96 [S]. Beijing: China Building Industry Press,1996.)

[11] 石文龙. 平端板连接半刚性梁柱组合节点的试验与理论研究 [D]. 上海:同济大学,2006.
(Shi Wen-long. Experimental and theoretical research on flat end plate semi-rigid beam-to-column composite connections [D]. Shanghai: Tongji University,2006.)